

Impacto das Parametrizações de Camada Limite Planetária do MM5 na Previsão de Ventos em Baixos Níveis

Impact of the MM5 Planetary Boundary Layer Parameterizations on Wind Forecast at Low Levels

Impacto de las Parametrizaciones de la Capa Límite Planetaria del MM5 en la Previsión de Vientos en Bajos Niveles

Capitão Especialista em Meteorologia Gerson Luiz Camillo

Graduado em Informática - UFSM
EAOAR (CAP 2/2010) e ICEA/CINDACTA I (Projeto de Modelagem Numérica de Tempo)
BRASÍLIA/DF
gerson.camillo@gmail.com

RESUMO

O modelo de previsão numérica MM5 é composto de equações básicas do movimento atmosférico e de parametrizações. Uma delas é a de camada limite planetária (CLP), onde ocorrem importantes fenômenos meteorológicos que interferem na atividade humana, como o nevoeiro, cuja previsão depende de análise de vários fatores, incluindo o vento. O objetivo desta pesquisa foi de quantificar influências das parametrizações CLP na previsão de ventos em níveis baixos do modelo MM5 para a localidade de Porto Alegre, em condições atmosféricas estáveis. Esta pesquisa classifica-se como descritiva, quanto aos fins e experimental, quanto aos meios, de maneira que foram selecionados cinco dias típicos seguidos com ocorrência de nevoeiro. O período foi caracterizado pela presença de uma camada estável em níveis baixos. Os seguintes esquemas de parametrização foram avaliados: Blackadar, Burk-Thompson, MY2.5, Hong-Pan e Gayno-Seaman. O modelo foi executado com um esquema diferente para todos os dias. As previsões foram correlacionadas com as observações obtidas da radiossondagem de SBPA das 12 UTC. A parametrização Blackadar e Hong-Pan foram as que influenciaram o MM5 de forma a produzir os resultados de magnitude de vento mais próximos aos dados observacionais. Quanto à direção do vento, a maior parte dos esquemas obteve bons resultados, exceto Burk-Thompson, que divergiu a partir de 300 m. Concluindo, tanto a parametrização Hong-Pan quanto a Blackadar podem ser usadas no modelo de previsão MM5, principalmente quando a atmosfera encontrar-se estável em níveis baixos.

Palavras-chave: MM5. Parametrização. Camada limite planetária. Vento.

Recebido / Received / Recibido
28/02/11

Aceito / Accepted / Acepto
04/04/11

ABSTRACT

The numerical forecast model MM5 is composed of basic equations of atmospheric motion and parameterizations. One of these is the planetary boundary layer (PBL), where there are major phenomena that interfere with human activity, such as fog, whose prediction depends on analysis of several factors, including wind. This research aimed to quantify the influence of PBL parameterizations on wind forecast at low levels of MM5 model applied to Porto Alegre, facing stable atmospheric conditions. Concerning to its purposes, this research is classified as descriptive. Concerning to its object, this research is classified as experimental so as five typical consecutive foggy days were selected. The period was characterized by the presence of a stable layer at low levels. The following parameterization schemes were evaluated: Blackadar, Burk-Thompson, MY2.5, Hong-Pan, and Gayno-Seaman. The model was run with a different scheme for each day. The predictions were correlated with those observations obtained from SBPA radiosonde of 12 UTC. The Hong-Pan and Blackadar parameterization were the ones that influenced the MM5 to produce the results of wind magnitude closer to observational data. As to wind direction, most of the schemes obtained good results, except for Burk-Thompson, which diverged from 300 m on. In conclusion, both the Hong-Pan and the Blackadar parameterizations can be used in the prediction model MM5, especially when the atmosphere is stable at low levels.

Keywords: MM5. Parameterization. Planetary boundary layer. Wind.

RESUMEN

El modelo de previsión numérica MM5 é composto por ecuaciones básicas del movimiento atmosférico y por parametrizaciones. Una de ellas es la de la capa límite planetária (CLP), dónde ocurren importantes fenómenos meteorológicos que interfieren en la actividad humana, como la niebla densa, cuya previsión depende del análisis de varios factores, incluyendo el viento. El objetivo de esta investigación fue cuantificar influencias de las parametrizaciones CLP en la previsión de vientos en bajos niveles del modelo MM5 para la localidad de Porto Alegre, en condiciones atmosféricas estables. Esta investigación se clasifica como descriptiva, cuanto a los fines, y experimental, cuanto a los medios, de manera que fueron seleccionados cinco días típicos seguidos com ocurrencia de niebla densa. El período fue caracterizado por la presencia de una capa estable en bajos niveles. Los siguientes esquemas de parametrización fueron evaluados: Blackadar, Burk-Thompson, MY2.5, Hong-Pan e Gayno-Seaman. El modelo fue ejecutado com un esquema distinto para cada día. Las previsiones fueron correlacionadas con las observaciones obtenidas de la radiossondagem de SBPA de las 12 UTC. La parametrización Blackadar y Hong-Pan fueron las que influyeron el MM5 de forma a producir los resultados de magnitud de viento más cerca a los datos observacionales. Quanto a la dirección del viento, la mayor parte de los esquemas obtuve buenos resultados, excepto Burk-Thompson, que divergió a partir de 300 m. Concluyendo, tanto la parametrización Hong-Pan quanto la Blackadar pueden ser usadas en el modelo de previsión MM5, principalmente cuando la atmosfera encontrarse estable en bajos niveles.

Palabras-clave: MM5. Parametrización. Capa límite planetaria. Viento.

INTRODUÇÃO

A Meteorologia Aeronáutica, campo aplicado da Ciência Meteorológica, tem evoluído nos últimos anos, em consonância com o aumento do tráfego aéreo no Brasil e no mundo. Nesse contexto, as previsões meteorológicas têm-se tornado sobremaneira relevantes no planejamento dos voos, com vistas à redução de custos e à segurança das operações aéreas.

Já no campo militar, o Ministério da Defesa criou a Comissão de Meteorologia Militar (COMETMIL), em 2002, que tem como finalidade a coordenação das atividades de Meteorologia de interesse militar em todo o território nacional.

Visando estabelecer um novo patamar de prestação de serviços em Meteorologia Aeronáutica, a Força Aérea Brasileira (FAB) está estabelecendo um ambiente de pesquisa por meio das atividades do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Das várias áreas de pesquisa em Meteorologia que o DECEA estabeleceu, uma é a de modelagem numérica de tempo para a qual foi criado um Grupo de Trabalho. Os estudos e a respectiva implantação de um modelo de previsão numérica de tempo no Centro Nacional de Meteorologia Aeronáutica (CNMA) e no Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA) têm proporcionado aumento substancial nos conhecimentos nessa área.

Nesse ínterim, surgiram dúvidas envolvendo as parametrizações¹ de camada limite planetária (CLP) do modelo MM5 (*Fifth-generation Mesoscale Model* - Modelo de Mesoscala de Quinta-Geração) e a previsão de vento em níveis baixos. As parametrizações de CLP² são formulações mais simples dos complexos processos físicos que ocorrem nas camadas mais próximas à superfície terrestre. O principal processo é a turbulência, que é a responsável pela distribuição dos fluxos de superfície (calor, umidade e momento) dentro da camada limite planetária. Os modelos numéricos de previsão, neste caso representado pelo MM5, constituem-se em códigos que solucionam equações de movimento do ar atmosférico além das variáveis de temperatura, umidade e pressão. Mas o estágio atual de desenvolvimento desses programas limita os meios disponíveis para modelar os processos que ocorrem na camada limite planetária.

Portanto, surgiu este questionamento: em que medida as diferentes parametrizações disponíveis no modelo MM5 influem na previsão de direção e velocidade do vento em baixos níveis quando há uma camada estável da atmosfera?

O relacionamento entre as parametrizações de camada limite planetária e as previsões de vento foram pouco exploradas por trabalhos anteriores. Os maiores objetivos desses estudos eram o de entender os processos turbulentos e sua dinâmica temporal. Por exemplo, Braun e Tao (2000) e Bright e Muller (2002) investigaram a influência da parametrização de CLP do MM5 na previsão de vento, mas focado no vento de superfície e em condições sinóticas diversas, como em um furacão, no primeiro estudo. Zhang e Zheng (2004) fizeram uma avaliação quanto ao vento em superfície, mas também para um perfil vertical de vento em toda a atmosfera. Steeneveld *et al.* (2006) e Durante e Paus (2006) constataram a importância da influência das parametrizações de CLP em camadas estáveis, realizando estudos propositivos relacionando os esquemas à previsão de vento.

Em relação aos trabalhos anteriores, esta pesquisa abordará as parametrizações, quanto à previsão de vento, para um perfil vertical em baixos níveis. Além disso, perto da superfície deverá reinar estabilidade e, para tanto, os dias deverão ser escolhidos de forma a não sofrerem com eventos atmosféricos transientes, como frentes, linhas de tempestade, etc. Os mais propícios seriam aqueles nos quais houvesse formação de nevoeiro ou névoa úmida, indícios fortes de uma atmosfera estável em níveis próximos à superfície.

A importância desta pesquisa reside no fato de que para a previsão de nevoeiros não há meios diretos disponíveis, mas um conjunto de dados que o meteorologista precisa interpretar para poder estimar a formação ou não desses fenômenos. Um desses parâmetros é o vento em níveis baixos, que pode indicar e discriminar as condições para formação de nevoeiro ou névoa úmida.

A presença desses fenômenos atinge diretamente o tráfego aéreo, podendo também trazer problemas a outras atividades humanas, como transporte terrestre e fluvial. Apesar do atual estágio de conhecimento, a previsão desse fenômeno permanece limitada devido à considerável variabilidade no tempo e espaço e também às diversas interações entre os vários processos físicos (GULTEPE, 2007).

A linha de pesquisa na qual o presente trabalho está enquadrado é o de Emprego da Força Aérea, uma vez que a Meteorologia Aeronáutica desempenha um papel fundamental na segurança e planejamento das missões militares.

Como objetivo geral fica estabelecido o seguinte: quantificar as influências dos diversos esquemas de parametrização de camada limite planetária na previsão de direção e velocidade dos ventos pelo modelo numérico MM5, num perfil vertical até mil e quatrocentos metros, sobre a área da cidade de Porto Alegre, numa atmosfera estável nos primeiros níveis.

Para responder ao objetivo geral, foram estabelecidos objetivos específicos, ou seja, metas que deverão ser realizadas no sentido de chegar à conclusão desta investigação:

- a) descrever a estrutura geral, o funcionamento e as características básicas do modelo de previsão numérica MM5;
- b) analisar os tipos de parametrizações de camada limite planetária disponíveis no MM5;
- c) executar o modelo MM5 para realizar previsões de 24 horas, iniciando em determinados dias típicos, escolhidos de forma a analisar o comportamento das parametrizações em presença de atmosfera estável nos níveis baixos; e
- d) analisar a sensibilidade do modelo MM5 às parametrizações de CLP disponíveis, quanto à previsão de vento em baixos níveis.

A parametrização que já vem selecionada por padrão no código do MM5 é a Hong-Pan (HONG; PAN, 1996 *apud* THOMSEN; SMITH, 2006), também especificada como *Medium Range Forecast* (MRF). Os fatores que podem explicar a inclusão do Hong-Pan

¹ De forma ilustrativa, parametrizações seriam "janelas" ideais através das quais se obtém um entendimento dos diversos processos físicos meteorológicos de alta complexidade através da redução para formas mais fundamentais (e simples).

² Camada mais baixa da troposfera terrestre, que se estende da superfície até alturas entre 100 e 3.000 metros.

como esquema de parametrização padrão do MM5 são: estar sendo empregado em larga escala nos modelos numéricos da atmosfera, por ser bastante econômico computacionalmente e também por produzir resultados razoáveis em condições atmosféricas típicas (BRIGHT; MULLEN, 2002; LEE; FERNANDO, 2003). Em consideração aos fatores expostos e também como possui suporte a quatro regimes de estabilidade, a hipótese do presente trabalho é a seguinte: a parametrização Hong-Pan é a que impacta o modelo MM5 no sentido de gerar previsões mais corretas de direção e magnitude de vento nos níveis próximos à superfície terrestre.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a seção um define camada limite planetária e parametrizações de CLP, além de trazer uma apresentação de trabalhos anteriores que exploraram o relacionamento entre parametrizações de CLP do MM5 e previsão de vento. Já a seção dois apresenta a metodologia usada para a obtenção dos dados, iniciando-se pela definição de todos os parâmetros necessários à operacionalização do modelo numérico e, principalmente, pela escolha de determinados dias para os quais será executado o MM5. Os resultados e a discussão estão na seção três, seguida da conclusão do presente trabalho.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presente pesquisa limita o estudo a uma pequena porção vertical da atmosfera terrestre conhecida como **camada limite planetária**. A troposfera estende-se da superfície até uma altitude média de 11 km mas, frequentemente, somente os primeiros quilômetros mais baixos são diretamente modificados pela superfície. Portanto, a camada limite planetária é parte da troposfera que é diretamente influenciada pela presença da superfície terrestre e que responde aos forçantes de superfície com escalas de tempo de aproximadamente uma hora ou menos. Dentro da camada limite planetária pode ser distinguida a **camada limite superficial**, mais próxima à superfície terrestre, mas que representa menos de 10% da camada limite. O ar acima da camada limite planetária é conhecido como atmosfera livre.

Os modelos de previsão numérica resolvem as equações que governam o movimento e os processos físicos básicos da atmosfera. Entretanto, os computadores atuais e os requisitos operacionais limitam a resolução horizontal e vertical dos modelos de previsão numérica, tornando-os inadequados para resolver os movimentos de pequena escala ou cuja física

desses processos sejam muito complexas (ARYA, 1977). Então, para os processos de escala menores que as resoluções das grades, são usados dados experimentais e concepções fundamentais mais simples, cujo processo é denominado de **parametrização**. As parametrizações não necessariamente simulam todos os processos físicos, pois é desejável que sejam computacionalmente simples. Portanto, representam os fluxos verticais de subgrade³ devido à turbulência, calculando tendências de calor, umidade e momento numa coluna atmosférica.

Uma das variáveis resolvidas pelas diversas parametrizações é conhecida como Energia Cinética Turbulenta (ECT) que é uma das mais importantes, pois mede a intensidade da turbulência. Ela encontra-se diretamente relacionada com o transporte de momento, calor e umidade através da camada limite planetária.

O prognóstico dos fluxos turbulentos contém mais incógnitas que equações disponíveis para resolvê-las. Quando novas equações são escritas para a variável independente, elas acabam por criar mais incógnitas, o que acaba por forçar o uso de parâmetros para alguns desses termos. Portanto, a inabilidade de fechar as equações dos fluxos turbulentos, para os quais alguns termos de alta ordem precisam ser parametrizados, é conhecido como problema de fechamento. A ordem de fechamento é a maior ordem da equação prognóstica cujos termos não são parametrizados.

A parametrização da camada limite planetária envolve a modelagem de dois tipos de fluxos: os de superfície (ou de camada limite superficial) e os verticais turbulentos, que realizam a difusão vertical da turbulência, os quais permeiam o restante da camada limite.

As **parametrizações dos fluxos superficiais** são modeladas usando a teoria da similaridade que envolve o comportamento padrão exibido pela observação empírica de diversos fenômenos da camada limite. A teoria mais amplamente usada pelas parametrizações presentes neste estudo é a de Monin-Obukhov, que representa a teoria da similaridade universal para a camada limite superficial da atmosfera. Esse método é uma técnica de fechamento de ordem-zero que implica em equações que são totalmente parametrizadas, não possuindo termos prognósticos.

A **parametrização dos fluxos verticais turbulentos**, que ocorrem acima da camada limite superficial, são parametrizados usando esquemas de fechamento local, não-local ou alguma equação que resolve a equação de energia cinética turbulenta, em uma ordem mais alta. Fechamento local relaciona incógnitas a variáveis conhecidas, perto da vertical dos

³ Do inglês sub-grid: nos modelos de previsão numérica de tempo, representam os processos cujas dimensões são menores do que as resoluções espaciais.

pontos de grade, de tal forma que esse esquema de turbulência mistura material entre camadas adjacentes. Já o fechamento não-local usa todos os pontos da vertical dentro da camada limite para determinar os termos que envolvam incógnitas, de forma que a turbulência mistura material entre todas as camadas simultaneamente.

Quanto à ordem de fechamento dos esquemas de difusão vertical, os locais chegaram a equações de até terceira ordem, enquanto os não-locais estão limitados somente aos de primeira ordem. Uma primeira consequência relacionada à ordem de fechamento é a velocidade de processamento, pois quanto maior a ordem, mais equações a resolver e maior é o tempo de execução do modelo. Portanto, os esquemas não-locais são originalmente mais rápidos que os locais. Além disso, os esquemas não-locais são mais adequados à parametrização dos efeitos dos grandes turbilhões em uma camada limite convectiva e instável.

As pesquisas mais relevantes, que relacionam parametrizações de camada limite planetária e previsão de ventos em baixos níveis, estão se tornando mais comuns em vista do interesse aumentado por implantação de sistemas eólicos.

Braun e Tao (2000) pesquisaram como as parametrizações de CLP do MM5 influenciaram a iniciação e desenvolvimento de um furacão sobre o oceano Atlântico, encontrando resultados em relação ao vento em superfície e também valores de vento em níveis mais altos. Para níveis aproximados de 1,2 km e 2,8 km, todas as parametrizações, Hong-Pan, Blackadar (BLK) e Burk-Thompson (B-T), simularam ventos muito mais intensos do que os observados.

Bright e Mullen (2002) verificaram o comportamento das diversas parametrizações de camada limite durante o período de monções no sudoeste dos EUA. Foram simulações durante 21 dias, nos quais estudaram o MM5 quanto à previsão de vento em todo o perfil vertical. Todas as parametrizações superestimaram os valores das componentes de sul do vento.

Zhang e Zheng (2004) avaliaram o ciclo diurno de vento e temperatura em superfície, realizando simulações para três dias (72 horas), durante três dias de julho, ou seja, num verão, caracterizado por fracos gradientes. Todas as parametrizações subestimaram a velocidade do vento em superfície durante o dia e a maior parte delas superestimaram para a noite. Já os perfis verticais de magnitude de vento das cinco parametrizações mostrou-se bastante similar, principalmente para o horário das 12 UTC.

Chen et al. (2005) usaram o modelo MM5 para estudar o comportamento das parametrizações em

áreas costeiras durante um período mais longo (quase dois meses) em relação aos dados de vento e fluxos de superfície. Constataram que o MM5 prevê o vento melhor em condições de tempo mais estáveis enquanto que, durante passagens frontais, produz erros grandes na direção do vento.

Já a pesquisa de Durante e de Paus (2006) procurou avaliar especificamente a parametrização de CLP do MM5 na previsão de vento dentro da camada limite planetária, pois o maior interesse era no estudo da energia eólica. Foram simulações para duas localidades distintas e as alturas foram estabelecidas em 130 metros e 200 metros. Os resultados diferiram para as duas localidades, quanto ao perfil vertical: em uma houve uma superestimativa da maior parte dos esquemas quanto à magnitude do vento, enquanto que, em outra, houve subestimativa. Para a localidade de Cabauw, a simulação dos esquemas B-T, Mellor-Yamada fechamento 2.5 (MY2.5) e Hong-Pan foram próximos, enquanto que em Wilhelmshaven, os esquemas MY2.5 e BLK obtiveram os melhores resultados, quando comparados com o B-T, Gayno-Seaman (G-S) e Hong-Pan. Já o Hong-Pan foi o esquema que apresentou os piores resultados. O estudo chegou a mais duas conclusões: a parametrização de CLP demonstra grande influência na simulação do perfil de vento e a mudança da resolução horizontal, de um para três quilômetros, não interferiu significativamente nos resultados.

Diferente dos estudos anteriores, Steeneveld et al. (2006) procuraram avaliar os modelos MM5, COAMPS e HIRLAM, quanto à parametrização de camada limite para regimes estáveis da atmosfera. Os estudos se estenderam por um perfil vertical da superfície até 1.500 metros. Quanto à direção do vento, todos os esquemas obtiveram resultados satisfatórios. Como havia a presença de um jato de baixo nível (JBN) bastante intenso, com velocidades de até 22 m/s em altura próxima a 500 metros, os resultados dos esquemas Hong-Pan, MY2.5, BLK e B-T subestimaram os valores por um fator de dois, apesar de predizerem corretamente a altitude do fenômeno e convergirem para valores bastante próximos uns dos outros. Os autores concluem recomendando o esquema B-T para o MM5 quando simulando camadas limites estratificadas.

O trabalho de Steeneveld et al. (2006) foi o que mais se aproximou do problema proposto por esta pesquisa. Mas o que diferencia este trabalho do anterior é a avaliação de esquemas de parametrização em camadas estratificadas e na qual não haja a presença de jatos de baixos níveis significativos. Os dias com essas características serão definidos na seção seguinte, onde serão abordados a amostra e os limites aplicados.

2 METODOLOGIA

A presente pesquisa é, quanto aos fins, descritiva e, quanto aos meios de investigação, experimental, conforme classificação em Vergara (2009).

O trabalho fará uso do modelo de mesoscala MM5, que é resultado de uma cooperação entre a Universidade do Estado da Pensylvania, nos EUA, e a Corporação Universitária para Pesquisas Atmosféricas (*University Corporation for Atmospheric Research – UCAR*). Desenvolvido e aperfeiçoado de forma colaborativa com instituições e universidades em todo o mundo, tem seu código distribuído na forma de domínio público, no seguinte endereço eletrônico: <<http://www.mmm.ucar.edu/mm5>>.

O modelo MM5 representa os dados (variáveis meteorológicas) de forma discreta, ou seja, em pontos de grade. Quanto ao modo de solução dos movimentos verticais da atmosfera, o MM5 classifica-se como não-

hidrostático, pois resolve a equação do movimento vertical, característica que torna esse modelo adequado a previsões de escala meteorológica abrangidas por formações de brisas, trovoadas, linhas de tempestade, complexos convectivos, dentre outras.

Para obtenção de previsões numéricas a partir de qualquer modelo numérico, deve-se proceder à especificação do domínio, número de níveis verticais e as diversas parametrizações com os quais se pretende trabalhar. Esses delineamentos devem ser incorporados antes de iniciar o processo de execução.

Para o presente caso foi definida somente uma grade com 110 por 110 pontos na horizontal, projeção *Lambert Conformal* e resolução espacial de 15 km. A latitude e longitude centrais da grade são: 29 graus Sul e 55 graus Oeste. O Gráfico 1 a seguir representa o domínio físico abrangido pela simulação, cujos valores limites de latitude são 21,488 e 36,36 Sul e de longitude, 45,7552 e 64,21 Oeste.

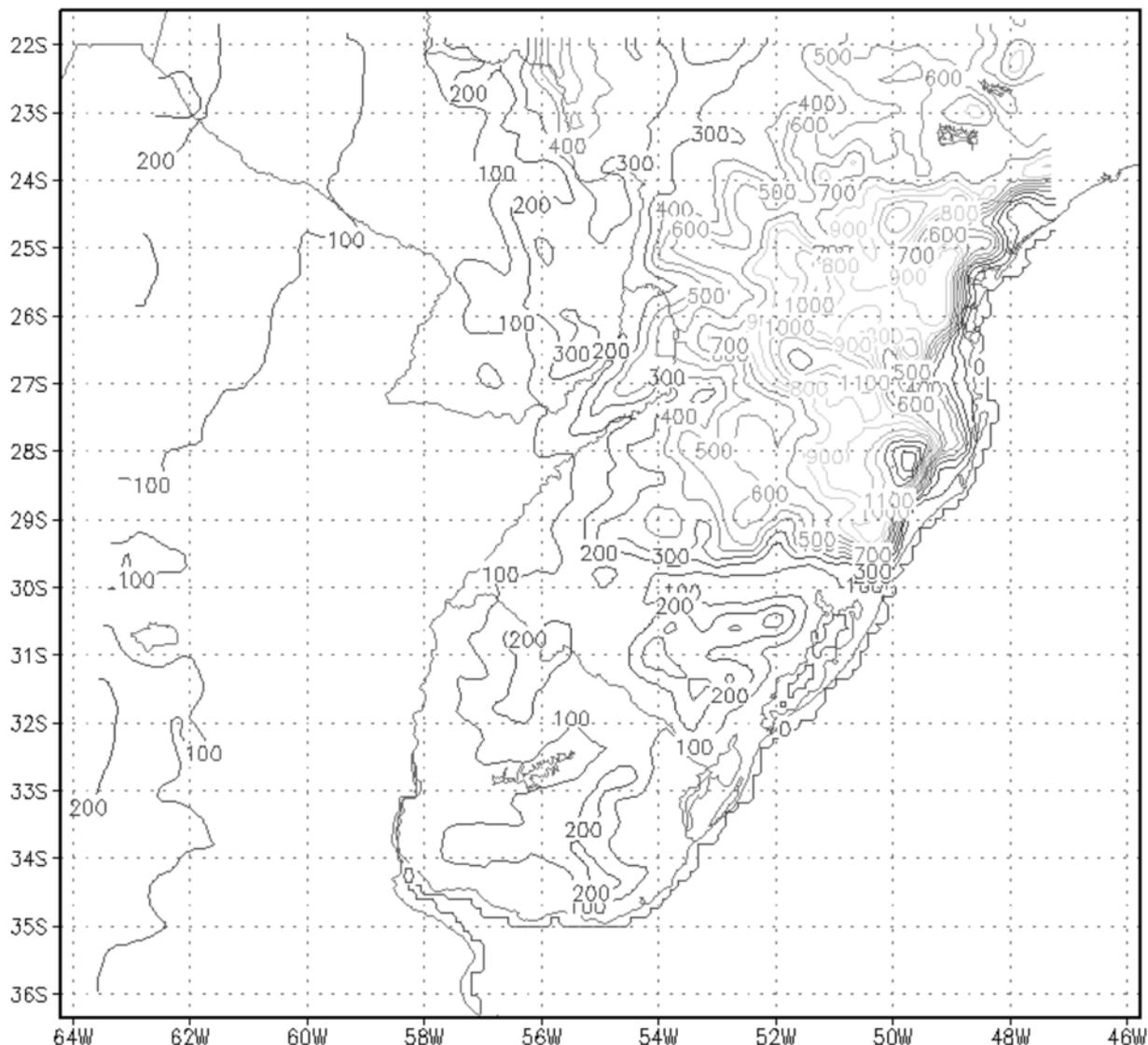


Gráfico 1: Representação da área e do terreno abrangidos pela configuração do modelo MM5 para o presente trabalho.

O número de níveis nos quais o modelo MM5 divide a atmosfera na vertical – conhecidos como níveis ou coordenadas sigma – foi estabelecido em 31, podendo variar entre 28 a 42, na maioria dos casos. Quanto mais níveis, melhor será a resolução vertical do modelo, mas também acarretará aumento do tempo de processamento da rodada. Esse número de níveis é o que vem sendo usado nas execuções do MM5 no contexto da previsão numérica no ICEA e CNMA. Nos primeiros mil metros, há 13 níveis; nos dois mil metros, 15 níveis, e nos três mil metros acima da superfície, 17 níveis. A alta resolução nos níveis mais baixos permite uma melhor simulação dos processos dentro da camada limite.

O MM5, sendo um modelo regional que realiza simulações e previsões para uma área geográfica limitada, necessita de dados globais para suprir de informações meteorológicas as condições iniciais e as fronteiras, durante todo o período de previsão. A inicialização ocorreu com dados do modelo global *Global Forecast System* (GFS), que estão disponíveis no endereço de Internet <ftp://ftp.rpd.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod> do Centro Nacional para Previsão Ambiental (*National Centers for Environmental Prediction* – NCEP), órgão do governo dos EUA. A resolução horizontal desses dados é de 0,5 grau de latitude/longitude, em média 55 km, que serão interpolados para a resolução do modelo, que é de 15 km. O passo no tempo foi definido em 22 segundos.

Os dados de terreno (topografia) e os de uso do solo foram obtidos do conjunto de dados do órgão norte-americano *U.S. Geological Survey* (USGS), disponíveis no mesmo endereço eletrônico do modelo MM5. As resoluções horizontais dessas informações são de cinco minutos, o que equivale, aproximadamente, a 9 km.

Para as opções de física, foram usados o esquema de parametrização de nuvens *cumulus* de Grell et al. (1994 apud UCAR, 2010) e a parametrização de microfísica de

nuvens *Simple Ice* de Dudhia (UCAR, 2010). Os restantes das opções de física foram iguais para todos os casos, exceto as seguintes: IMVDIF e ISOIL. A primeira, IMVDIF, indica os tipos de difusão vertical úmida, enquanto que a opção ISOIL delimita as formas como são previstas as temperaturas abaixo da superfície.

Neste trabalho foram testadas cinco parametrizações presentes no modelo MM5, excetuando-se a Bulk, por ser simples, e a Pleim-Chang, que demanda um esquema de temperatura de solo diferente dos outros. São elas: Blackadar (BLK), Burk-Thompson (B-T), Mellor-Yamada fechamento 2.5 (MY2.5), Hong-Pan e Gayno-Seaman (G-S). As características gerais das parametrizações estudadas neste trabalho estão apresentadas na seguinte tabela.

Conforme consta à Tabela 1, três tipos de parametrizações de camada limite são derivados do esquema Mellor-Yamada, que é de ordem 2.5 de fechamento: B-T, MY2.5 e G-S. As três calculam a ECT, que permite a previsão dos coeficientes de difusão turbulenta. A parametrização MY2.5 e a G-S são de fechamento local de ordem 1.5, enquanto a B-T é de fechamento local de segunda ordem. Já as parametrizações BLK e Hong-Pan são esquemas de fechamento local de primeira ordem, mas se baseiam em concepções diferentes: a BLK que se originou do esquema proposto por Blackadar e a Hong-Pan nos conceitos de Troen-Mahrt.

As parametrizações BLK, Hong-Pan e G-S possuem a opção de IMVDIF enquanto que as B-T e MY2.5 não a possuem. O parâmetro ISOIL especifica como as parametrizações de CLP interagem com os esquemas de parametrização da temperatura do solo. Todas as parametrizações, exceto a B-T, que usou o esquema de solo Blackadar, tiveram definidos o modelo de cinco camadas (*five-layer soil model*).

A região abrangida pela cidade de Porto Alegre foi escolhida, considerando os seguintes motivos:

Tabela 1: Propriedades dos esquemas de parametrização de CLP incluídos no sistema de previsão numérica MM5.

Nome	Abrev.	Esquemas originários	Ordem de fechamento	Teoria para a difusão vertical turbulenta	Difusão vertical	Similaridade da camada superficial	Regimes de estabilidade
Blackadar	BLK	Blackadar	primeira ordem	K-theory	não-local	Monin-Obhukov	4
Burk-Thomphon	B-T	Mellor-Yamada	segunda ordem	ECT	local	Louis	2
Mellor-Yamada Eta	MY2.5	Mellor-Yamada	1.5 ordem	ECT	local	Monin-Obhukov	2
Hong-Pan	Hong-Pan	Troen-Mahrt	primeira ordem	K-theory	não-local	Monin-Obhukov	4
Gayno-Seaman	G-S	Mellor-Yamada	1.5 ordem	ECT	local	Monin-Obhukov	4

Fonte: adaptado pelo autor de Durante e de Paus (2006).

a) no Aeroporto Internacional Salgado Filho encontra-se uma estação de radiossondagem, que permite realizar sondagens verticais da atmosfera, fornecendo dados de temperatura, umidade e vento em diversos níveis; e

b) por estar sujeito à formação de diversos tipos de nevoeiro, causando grande impacto nas atividades de navegação aérea.

O nevoeiro de radiação é um fenômeno meteorológico que se forma primordialmente em uma atmosfera estável, em ar estagnado e associado a um anticiclone. Um dos efeitos de um anticiclone é a inibição de movimentos verticais da atmosfera e, em consequência, a manutenção de umidade em níveis baixos. Para o aeródromo de Porto Alegre, os meses mais propícios à formação de nevoeiro e nebulosidade estratiforme com base abaixo de 200 pés são, em ordem decrescente: maio, junho, julho, agosto e setembro, conforme tabelas climatológicas das restrições operacionais obtidas no endereço eletrônico <<http://www.redemet.aer.mil.br>>. Portanto, a escolha dos dias para proceder ao estudo levou em consideração esses aspectos.

Os dias foram definidos após verificar a situação sinótica no endereço eletrônico do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e as condições de tempo em superfície por meio de Mensagens de Informe Meteorológico Aeronáutico Regular (*Meteorological Aerodrome Report* – METAR). Analisando os dias em que não houve condições meteorológicas transientes por meio dos Boletins Técnicos do CPTEC e verificando aqueles em que houve formação de nevoeiros e névoa úmida por meio das mensagens METAR, chegou-se a alguns dias, sendo que houve um período de cinco dias consecutivos dentre esses meses, no ano de 2010, que satisfizeram essas condições. São eles: 30 de junho, 1º, 2, 3 e 4 de julho.

Para cada um desses dias, o modelo MM5 foi executado cinco vezes, com determinada parametrização de CLP, que foram: BLK, B-T, MY2.5, Hong-Pan e G-S. Todas foram iniciadas às 12 UTC e geraram previsões com validade de 24 horas. Os dados de verificação consistiram de radiossondagens da estação de altitude de Porto Alegre, cujos lançamentos são executados às 12 UTC e 00 UTC.

Os resultados das previsões numéricas do MM5 foram interpolados à coordenada de 30º sul e 51º18 min Oeste, para obtenção do perfil vertical do vento no ponto sobre a localização da estação de radiossondagem de SBPA.

As previsões de direção e velocidade do vento foram obtidas diretamente dos resultados do MM5 em níveis *sigma*. As seguintes alturas em metros, em relação à

superfície, foram selecionadas: 54,37 m, 90,79 m, 164,03 m, 200,86 m, 293,53 m, 462,6 m, 596,15 m, 751,07 m, 988,18 m e 1.355,15 m, num total de 10 níveis. Para cada dia, os dados de radiossondagem em alturas próximas às anteriormente relacionadas foram separadas, de tal forma a minimizar a diferença entre as alturas do MM5 e às observacionais. Esse procedimento deve-se ao fato de, para cada radiossondagem, as alturas em que os valores dos dados medidos pela sonda em ascensão serem levemente diferentes. A comparação de resultados ocorreu, portanto, entre as previsões de validade de 24 horas (12 UTC do dia seguinte) e as observações de ar superior às 12 UTC desse mesmo dia.

Os resultados que estão expostos na próxima seção serão comparados com achados de trabalhos anteriores e discutidos em vistas das principais características de cada esquema de parametrização.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo MM5 foi executado vinte e cinco vezes, sendo cinco rodadas para cada uma das parametrizações (BLK, B-T, MY2.5, Hong-Pan e G-S), durante os cinco dias. O Gráfico 2 ilustra a média, na vertical, de todos os valores de magnitude de vento obtidos nos cinco dias de previsão considerando cada parametrização e também os dados observados pela radiossondagem.

Para permitir uma melhor análise gráfica dos resultados, as previsões de vento com validade de 24 horas (às 12 UTC do dia seguinte ao início da previsão) foram comparadas com os dados observados. O cálculo realizado foi uma diferença entre valores previstos e os observados. Esse procedimento foi executado para os resultados de cada parametrização e, ao final, foi produzida uma média representativa dos cinco dias. A magnitude e a direção do vento foram consideradas separadas e geraram dois gráficos, que serão analisados a seguir.

O Gráfico 3 apresenta um perfil vertical da média das diferenças de magnitude. O eixo das abscissas expressa o valor médio das diferenças em metros por segundo (m/s) para cada parametrização, durante os cinco dias. Quando a velocidade do vento prognosticado pelo MM5 for maior que o vento observado pela radiossondagem, as diferenças serão positivas e, quando ocorrer o inverso, as diferenças serão negativas.

O comportamento de todas as parametrizações, quanto ao prognóstico da velocidade, é perceptivelmente igual, com dois máximos, um abaixo de 600 metros, no qual as velocidades prognosticadas pelo MM5 foram maiores que os valores das radiossondagens (superestimativa) e outro acima, no qual as previsões

Perfil vertical médio dos valores de velocidade do vento

Referência: média dos dias 01jul, 02jul, 03jul, 04jul e 05jul.

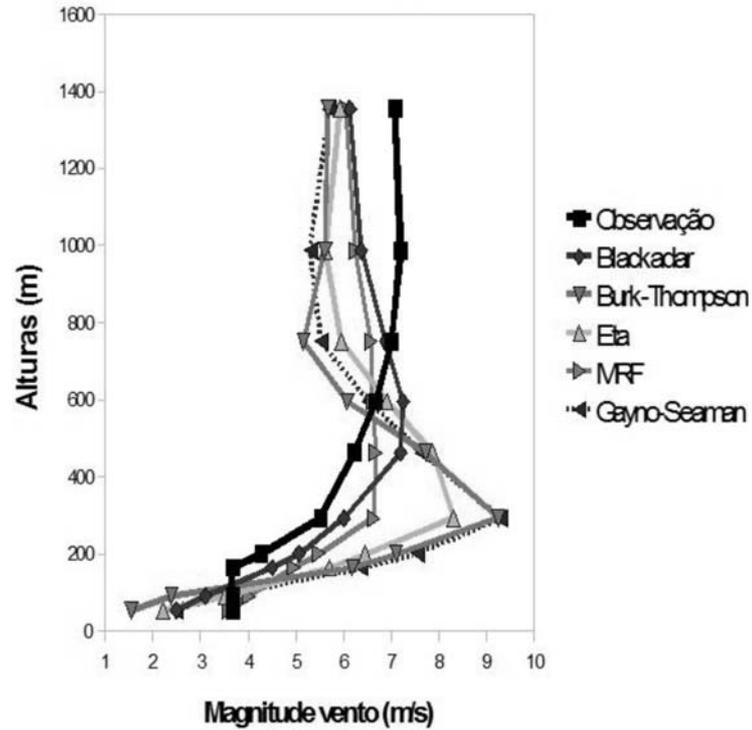


Gráfico 2: Perfil vertical das magnitudes médias dos valores previstos de cada parametrização e dos dados observacionais (radiossondagem) referentes aos cinco dias da simulação (01/07, 02/07, 03/07, 04/07 e 05/07)

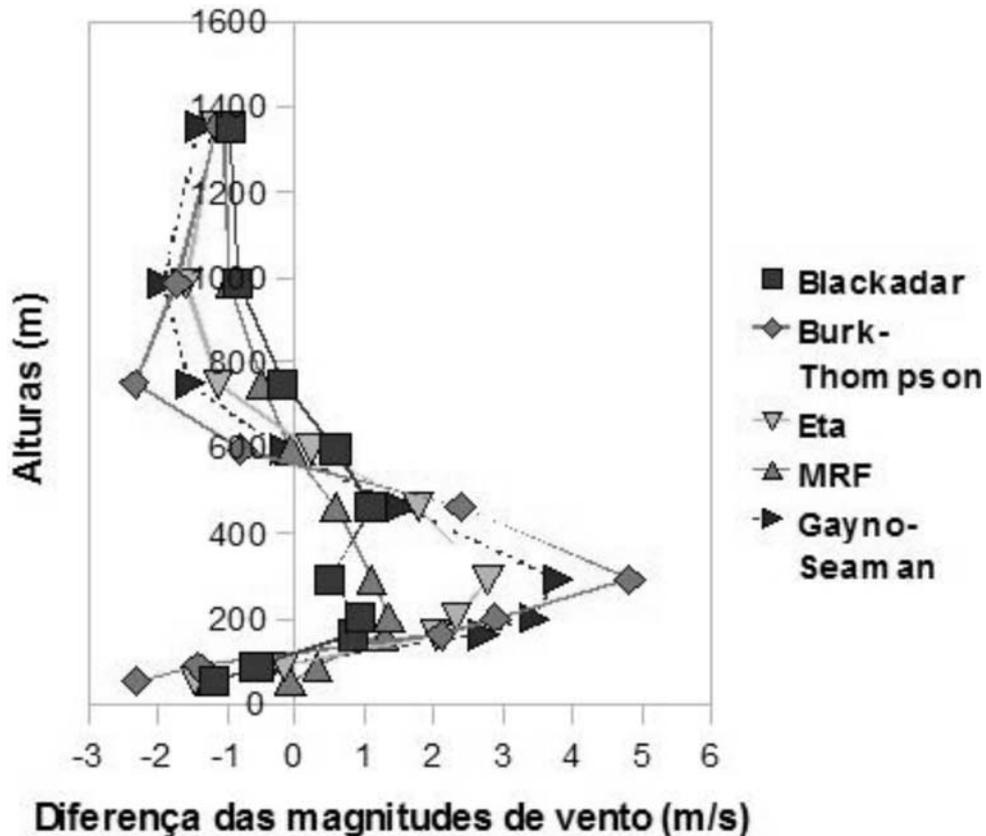


Gráfico 3: Média das diferenças de magnitude de vento entre os valores previstos e os observados para todos os dias da simulação

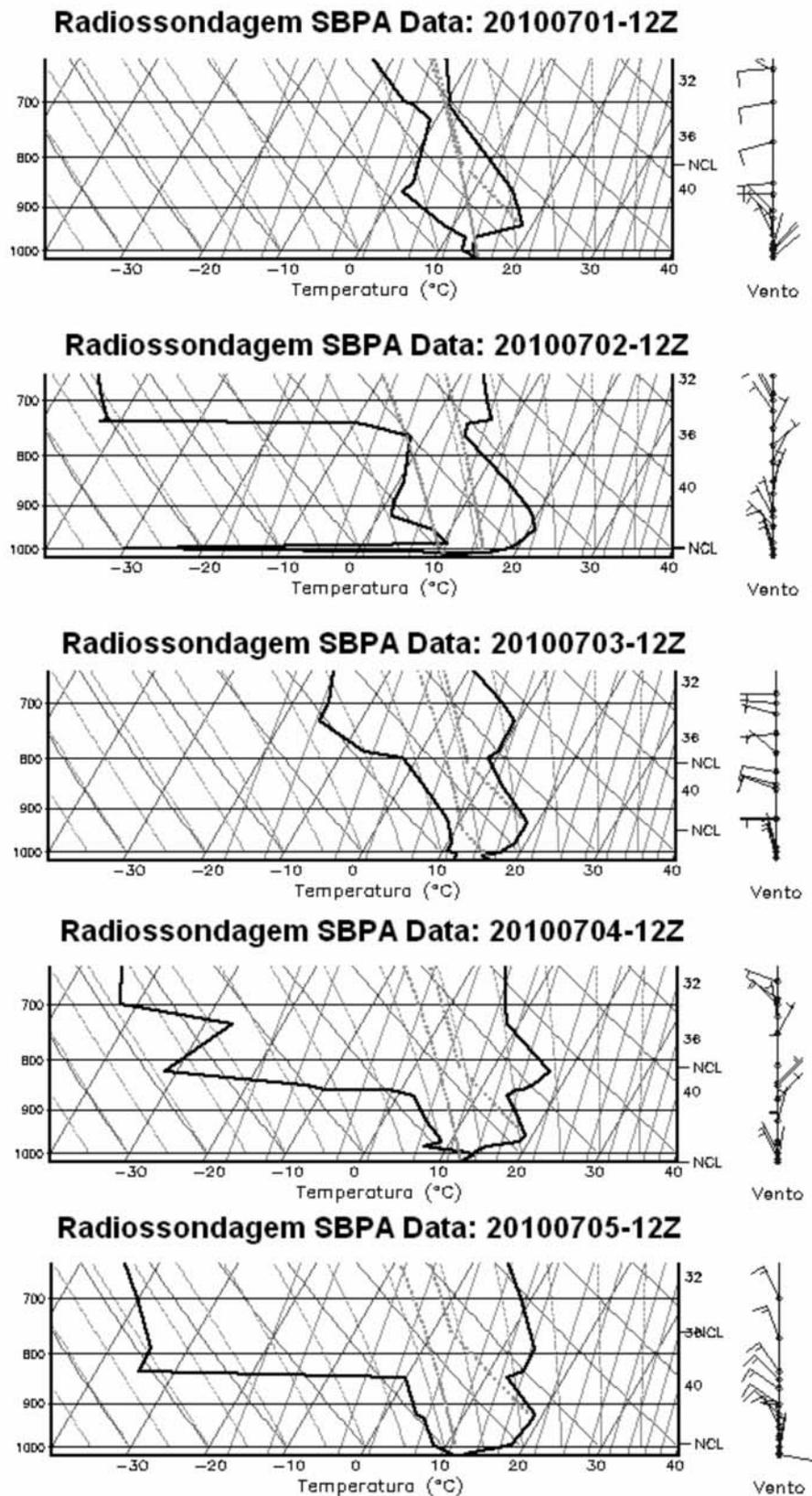


Gráfico 4: Perfis verticais (sondagens) de temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho e direção e velocidade de vento, de SBPA, das 12 UTC dos dias 1º, 2, 3, 4 e 5 de julho de 2010.

Fonte: dados obtidos do MASTER-IAG-USP, no endereço eletrônico <<http://www.master.iag.usp.br>> (2010).

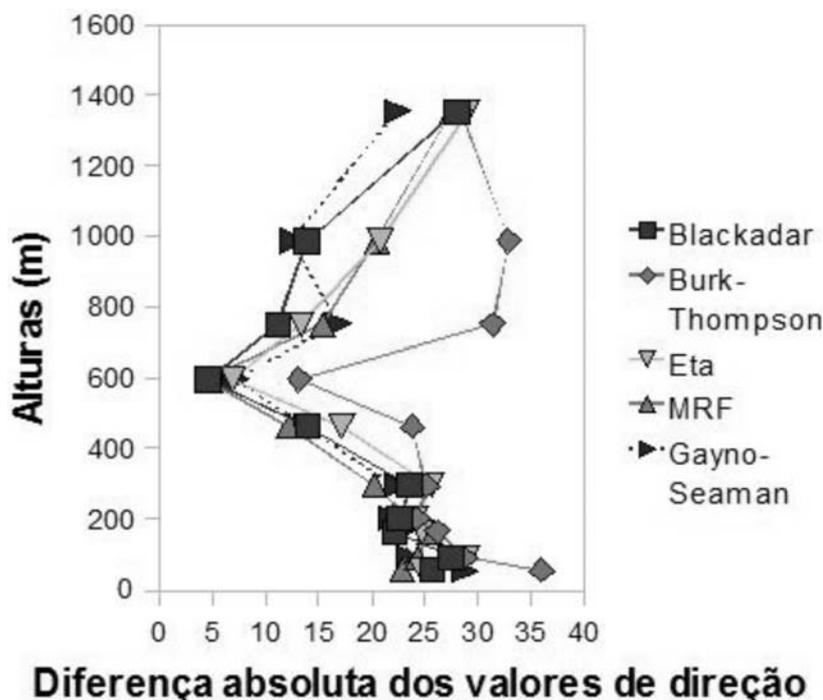


Gráfico 5: Média das diferenças absolutas de direção de vento entre os valores previstos e os observados para todos os dias da simulação.

foram abaixo do vento observado (subestimativas). A previsão de velocidades acima dos valores observados também foi encontrada nos trabalhos de Braun e Tao (2000), Bright e Mullen (2002) e Durante e de Paus (2006), neste caso, para uma das localidades avaliadas. Foram resultados bastante diferentes aos achados de Steeneveld et al. (2006), em que todos os esquemas subestimaram a magnitude do vento.

O destaque são os valores dos máximos positivos, pois os esquemas B-T, MY2.5 e G-S simularam um perfil de jato de baixo nível JBN com valores de magnitude de vento entre três e cinco metros por segundo acima dos observados. Confrontando as médias das velocidades apresentadas no Gráfico 2, percebe-se que, na média do vento observado, não há configurado um JBN. Steeneveld et al. (2006) também encontraram os esquemas MY2.5 e B-T prevendo um JBN bem definido, apesar das magnitudes terem sido subestimadas. Enquanto isso, a diferença entre os resultados deste trabalho e os de Steeneveld et al. (2006) dizem respeito à presença de um jato de baixos níveis de grande intensidade nos trabalhos daqueles autores, de 22 m/s, enquanto que, neste estudo, observou-se apenas um evento de fraca intensidade, classificado como JBN Fraco no dia 1º de julho. Na pesquisa de Zhang e Zheng (2004), o esquema G-S foi o que simulou um jato bem definido, com valores entre 1,5 a 2 m/s acima do vento observado.

A partir da altura média de 600 metros, o esquema B-T foi o que apresentou os valores previstos mais divergentes que os observados, seguidos pelas

parametrizações MY2.5 e G-S. Os esquemas BLK e Hong-Pan foram, novamente, as parametrizações que melhor previram a magnitude do vento nessa faixa da atmosfera. Para o horário das 12 UTC no centro-oeste dos EUA, Zhang e Zheng (2004) também encontraram que todas as parametrizações simularam a velocidade menor que o observado. Além disso, os esquemas BLK e G-S foram os que obtiveram os melhores resultados no respectivo trabalho.

Percebeu-se que as parametrizações tiveram dificuldades de transição entre regimes estratificados para turbulentos. Isso fica aparente analisando os perfis termodinâmicos das radiossondagens de SBPA presentes no Gráfico 4, que mostram uma camada estável perto da superfície e que torna-se instável a partir de uma altura aproximada de 600-900 metros.

O Gráfico 5 apresenta as diferenças absolutas da direção do vento entre as modelagens do MM5 e as radiossondagens para cada parametrização. Por absoluto, deve-se entender que a diferença independe se a variação da direção seja no sentido horário ou anti-horário. Na coordenada das abscissas estão os valores das diferenças entre os resultados previstos e os observados, enquanto que na ordenada estão os valores de altura em metros.

O Gráfico 5 demonstra claramente que todos os esquemas influenciaram o modelo MM5 no sentido de produzirem valores bem próximos aos valores observados, concordando com aqueles encontrados por Steeneveld et al. (2006), neste caso, somente para os esquemas BLK, B-T, MY2.5 e Hong-Pan. A

parametrização B-T apresenta uma diferença nos valores previstos de direção do vento em relação ao restante dos esquemas, principalmente a partir de 300-400 metros de altura.

Com os resultados em pauta e confirmada a hipótese, acrescida do esquema BLK, que quantificou valores próximos ao Hong-Pan, pode-se progredir para a conclusão desta pesquisa, conforme transcrita na seção a seguir.

CONCLUSÃO

A atmosfera terrestre é um grande bolsão de ar que permite a vida em todas as suas formas, mas é dentro das primeiras centenas de metros onde o homem desenvolve suas atividades e também interfere no meio ambiente. Essa porção é conhecida como camada limite planetária e nela ocorrem as trocas turbulentas de calor, umidade e momento entre a superfície terrestre e a atmosfera livre logo acima.

Os modelos numéricos vieram a aplicar as formulações matemáticas para o escoamento atmosférico com o objetivo de prever o estado futuro da mesma. Mas há processos físicos que não são facilmente resolvíveis por meio de equações e, nesse caso, aplicam-se as parametrizações. Por isso, os modelos numéricos e o MM5, no caso da presente pesquisa, incorporaram parametrizações para vários mecanismos, sendo um deles o de camada limite planetária, que é o objeto de estudo deste trabalho.

Os nevoeiros de radiação formam-se na camada limite planetária e sua ocorrência está condicionada ao desenvolvimento de uma faixa estável nos níveis inferiores. Essa consideração levou ao problema desta pesquisa: em que medida as parametrizações de CLP do MM5 influenciavam na previsão de vento em baixos níveis, quando em presença de atmosfera estável nos primeiros níveis?

Por meio da escolha de cinco dias seguidos típicos, nos quais houve formação de nevoeiros e névoas e em que havia uma camada estável, foi executado o MM5 para cada parametrização, durante todos os dias. Foi escolhido o horário das 12 UTC (validade de 24 horas) para aferição com dados de radiossondagem. Nesse caso, trabalhou-se com a limitação de não se ter à disposição várias sondagens entre 00 e 12 UTC, o que não inviabilizaria o objetivo da pesquisa, mas torná-la-ia mais consistente e ampla.

Os resultados evidenciaram que todas as parametrizações superestimaram a magnitude do vento dentro da camada estável e subestimaram acima desta. Três esquemas, B-T, MY2.5 e G-S acabaram

por simular um jato de baixos níveis dentro da camada estável, quando na verdade o vento observado não tinha essa característica. Essa previsão poderia induzir o meteorologista ao erro quando da previsão de nevoeiro.

Para todo o perfil vertical, os esquemas de CLP que levaram o MM5 a simular as velocidades do vento próximos aos dados observacionais foram o BLK e o Hong-Pan. Essas duas parametrizações caracterizam-se por serem de fechamento de primeira ordem e por usarem esquemas não-locais de difusão turbulenta. Quanto à direção do vento, todos os esquemas de CLP obtiveram resultados próximos aos observacionais.

Portanto, a hipótese foi confirmada, tendo em vista que o objetivo era limitar o estudo ao comportamento das parametrizações para uma atmosfera estável nos primeiros níveis. O número de dias poderia ser um fator a minimizar os resultados obtidos, mas os mesmos foram coerentes para todo o período e demonstraram que a parametrização Hong-Pan foi a que impactou o modelo de previsão MM5, no sentido de produzir os valores de direção e magnitude do vento mais próximos aos observados, principalmente nos casos de atmosfera estável, condição primordial na formação de nevoeiros de radiação. A pesquisa também demonstrou que a parametrização BLK obteve resultados próximos aos obtidos pela Hong-Pan. Quanto à direção do vento, todos os esquemas de CLP obtiveram resultados próximos aos dados observacionais. Em alguns aspectos, foram confirmados alguns dados de pesquisas anteriores (ZHANG; ZHENG, 2004; STEENEVELD et al., 2006; DURANTE; PAUS, 2006), mas em outros houve discordância, que podem ter sido ocasionados pelos objetivos e pela própria metodologia empregada.

Dessa forma e com base nos resultados, sugere-se continuidade do uso do esquema de parametrização Hong-Pan no modelo MM5, principalmente quando são necessárias previsões mais fidedignas de vento numa camada limite planetária estável.

A importância de que se usem esquemas de parametrização de CLP que produzam previsões mais próximas aos dados observacionais afeta o nível de prestação do serviço de Meteorologia Aeronáutica, impactando na confiabilidade da informação prestada.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se avaliar a evolução temporal do comportamento das diferentes parametrizações, tanto para a previsão do perfil vertical do vento quanto para outras variáveis, como temperatura e umidade.

A implantação da modelagem numérica de tempo no âmbito do Comando da Aeronáutica é recente, apesar das pesquisas e usos estarem caminhando a passos largos no exterior e em muitas instituições nacionais.

A finalidade desta pesquisa foi de contribuir para um melhor conhecimento desse campo da Meteorologia e, em consequência, melhorar o serviço de previsão, tanto

para os usuários do Sistema de Controle do Espaço Aéreo (SISCEAB) quanto para o assessoramento das atividades estritamente militares.

REFERÊNCIAS

- ARYA, S. P. S. Suggested revisions to certain boundary layer parameterization schemes used in atmospheric circulation models. **Monthly Weather Review**, [S.l.], v. 105, issue 2, p. 215-227, feb. 1977.
- BRAUN, S. A.; TAO; W. Sensitivity of High-Resolution Simulations of Hurricane Bob (1991) to Planetary Boundary Layer Parameterizations. **Monthly Weather Review**, v. 128, issue 12, p. 3941–3961, dec. 2000.
- BRIGHT, D. R.; MULLEN, S. L. The Sensitivity of the numerical simulation of the southwest monsoon boundary layer to the choice of PBL turbulence parameterization in MM5. **Weather and Forecasting**, [S.l.], v. 17, issue 1, p. 99-114, feb. 2002.
- CHEN, C. et al. Using MM5 to hindcast the ocean surface forcing fields over the gulf of maine and georges bank region. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, [S.l.], v. 22, issue 2, p. 131-145, feb. 2005.
- DURANTE, F.; de PAUS, T. A comparison of MM5 and meteo mast wind profiles at Cabauw, the Netherlands and Wilhelmshaven, Germany. e **WindEng Journal**, [S.l.], 2006. Disponível em: <<http://ejournal.windeng.net/13/>>. Acesso em: 10 set. 2010.
- GULTEPE, I. Fog and boundary layer clouds: fog visibility and forecasting. **Pure and Applied Geophysics**, [S.l.], v. 164, n. 6-7, 2007.
- HOLTSLAG, A. A. M.; BOVILLE, B. A. Local Versus Nonlocal Boundary-Layer Diffusion in a Global Climate Model. **Journal of Climate**, [S.l.], v. 6, issue 10, p. 1825-1842, oct. 1993.
- LEE, S-M.; FERNANDO, H. J. S. Planetary boundary layer structure of the paso del norte airshed: a numerical study. **The U.S.-Mexican border environment: Air Quality Issues along the U.S.-Mexican Border**, [S.l.], n. 6, p. 59-80, 2003. Disponível em: <<http://www.scerp.org/pubs/m6c2.pdf>>. Acesso em: 27 set. 2010.
- STEENEVELD, et al. Mesoscale model intercomparison and observational evaluation for three contrasting diurnal cycles in CASES99: focus on the stable boundary layer. In: 17th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, San Diego, CA, may 2006 **Anais eletrônicos...** San Diego, CA, may 2006. Disponível em: <ams.confex.com/ams/pdfpapers/109560.pdf>. Acesso em: 19 set. 2010.
- THOMSEN, G. L.; SMITH, R. K. The importance of the boundary layer parameterization in the prediction of low-level convergence lines. **Monthly Weather Review**, [S.l.], v. 136, issue 6, p. 2173–2185, June 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1175/2007MWR2190.1>>. Acesso em: 25 set. 2010.
- UCAR. **MM5 Tutorial**. Disponível em: <<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/documents/tutorial-v3-notes.html>>. Acesso em: 08 ago. 2010.
- VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 10. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- ZHANG, D.; ZHENG, W. Diurnal cycles of surface winds and temperatures as simulated by five boundary layer parameterizations. **Journal of Applied Meteorology**, [S.l.], v. 43, issue 1, p.157-169, Jan. 2004.